

# 電磁波解析ソリューション Poynting for Optics 解析事例

2024 年 10 月

富士通株式会社

Poynting サポートセンター

1




1 透過	ð·反射計算	4
1.1	構造色の解析	4
1.2	モスアイ型反射防止コーティングを用いたシリコン太陽電池の解析	9
1.3	シリコンナノワイヤアレイを用いた太陽電池の吸収特性解析	12
1.4	CMOS イメージセンサーのクロストーク解析	14
1.5	周期境界条件における斜め入射機能を使った解析	16
2 散話	1問題	21
2.1	微小導体球の散乱解析	21
3	マテリアル	23
3.1	フォトニック結晶の透過特性解析	23
3.2	フォトニック結晶および左手系媒質によるスーパープリズムおよびスーパーレンズ効果。	26
3.3	フォトニック結晶方向性結合器	31
3.4	フォトニック結晶光導波路	33
4 プラ	ズモン共鳴	35
4.1	表面プラズモンの解析	35
4.2	プラズモン集光器	38
4.3	ナノ金粒子の局在表面プラズモンを用いたシリコン太陽電池の解析	40
5 光フ	リアイバー	42
5.1	光ファイバーの解析	42
6 光波	<b>安・熱解析連携</b>	44
6.1	光ファイバープローブモデルの熱解析	44
6.2	移動光源で照射された薄膜の熱解析	46



開発元:富士通株式会社 Poyntingサポートセンター

お問い合わせ先:

富士通Poyntingサポートセンター E-mail:<u>fj-tcsu-pyntsup@dl.jp.fujitsu.com</u>



記載内容は2024年 10月現在のものです。 記載内容はお断りなしに変更することもございますのでご了承下さい。



#### 1 透過·反射計算

#### 1.1 構造色の解析

#### 構造色とは

光の波長あるいはそれ以下の微細構造による、分光に由来する発色現象のこと。CD、DVDのように微細な溝・ 突起などによる干渉によって発色する場合、玉虫やカナブンの体色のように多層膜によって発色する場合、また、 シャボン玉のように薄膜干渉によって発色する場合などがある。

モデリング
-------

項目	設定値
解析領域(X,Y,Z)	(300nm, 300nm, 1800nm)
解析物理時間	200fs
境界条件	X,Y: 周期境界条件(PBC) Z: PML 吸収境界条件
格子数	561,600 (60, 60, 156)
時間ステップ数	21,194
時間ステップ間隔	0.009436583 fs
格子サイズ	X,Y:5nm, Z:5-20nm



#### 参考文献:

高原 他, "誘電体光アンテナによる高解像度カラー画像", 応用物理 第88巻 第4号 (2019), 276 Y. Nagasaki, et al., "All-Dielectric Dual-Color Pixel with Subwavelength Resolution", Nano Lett. 2017, 17, 7500-7506



<u>Siの物性値の設定</u> 屈折率(誘電率)の分散特性



分散式

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_0 \left( \varepsilon_{\infty} + \frac{f_d \omega_p^2}{-\omega^2 + j\omega\Gamma_d} + \frac{f_1 \omega_p^2}{-\omega^2 + j\omega\Gamma_1 + \omega_1^2} \right)$$

パラメータ

変数	設定値
$\mathcal{E}_{\infty}$	16.0
$\omega_n$	408.8821 THz
$\Gamma_d$	0.1691384 THz
$f_d$	5.9994
$\omega_1$	879.2294 THz
Γ <sub>1</sub>	142.0569 THz
$f_1$	12.881

Poyntingのフィッティング機能を用いて算出

## 計算時間

解析時間・・・解析モデル 532[sec]、リファレンスモデル 126[sec] 使用計算機・・・CELISUIS R920(富士通) CPU : Intel Xeon E5-2690(2.90GHz),メモリ128[GB]



### 解析結果

電界瞬間値











7



## Siのサイズを変えた解析

Poyntingのパラメータスイープ機能を使用して4ケースを連続して計算しています。

## 反射スペクトル





#### 1.2 モスアイ型反射防止コーティングを用いたシリコン太陽電池の解析

文献 : C. Sun, P.Jiang, and B. Jiang. "Broadband moth-eye antireflection coatings on silicon", Appl. Phys. Lett. vol.92, 061112 (2008)



文献 : Green, M.A. and Keevers, M. "Optical properties of intrinsic silicon at 300 K", Progress in Photovoltaics, p.189-92, vol.3, no.3; (1995)

## FUJITSU





## まとめ

- Poyntingを用いたモスアイ型反射防止コーティングを有するシリコン基板の反射特性解析
  - 3次元CAD機能を用いたモデル化が可能
  - Lorentz-Drudeモデルを用いた分散媒質の設定が可能
- モスアイ構造付近の電磁界の挙動を詳細に解析
- シリコンの周波数分散特性とモスアイ構造の効果を考慮した広帯域解析が可能



1.3 シリコンナノワイヤアレイを用いた太陽電池の吸収特性解析

### 背景

- 光や振動、熱などの身の回りにあるわずかなエネルギーを電力に変換し活用するエネルギーハーベスティング技術が、近年注目されている
- 太陽光発電の場合には、太陽電池の高効率化が必要不可欠になっている
- シリコン太陽電池の光吸収性能を、シリコンナノワイヤアレイを用いて改善する技術が最近提案(注1) された
- Poyntingを用いたシリコンナノワイヤアレイの光吸収解析を示す

```
(注1) 文献 :
```

L. Hu and G.Chen, "Analysis of Optical Absorption in Silicon Nanowire Arrays for Photovoltaic Applications", Nano Lett., vol.7, 3249, 2007.

## 解析モデル





(注2) 文献 :

Green, M.A. and Keevers, M. "Optical properties of intrinsic silicon at 300 K", Progress in Photovoltaics, p.189-92, vol.3, no.3; (1995)

## 解析結果



(注3) Reference :

A. Deinega and S. John, "Effective optical response of silicon to sunlight in the finitedifference time-domain method", Optics Letters, vol.37, no.1, January 1, 2012.



## まとめ

- Poyntingを用いたシリコンナノワイヤアレイの光吸収特性解析
- シリコンの広帯域分散特性とナノワイヤ形状を考慮
- 吸収特性の解析結果は、文献値とよく一致することを確認



1.4 CMOSイメージセンサーのクロストーク解析

#### 背景

- CMOSイメージセンサーにおけるクロストークは、空間分解能の劣化や感度の減少を生じ、結果として 画像のノイズ要因となる
- イメージセンサーの小型化にともない、デバイス内部の回折効果や複雑な光学特性を考慮して光の挙 動を把握する必要性が高まっている
- 本事例では、回折の影響が最も大きいと考えられる赤色の光に着目し、イメージセンサー内部の光のクロストーク解析結果を示す

#### 解析モデル







- 赤色の光は、赤色カラーフィルターだけを通過している
- 赤色の光は、Si基板上のPhotosensitive領域に到達
- 赤色フィルターからの漏れ(クロストーク)が、緑色カラーフィルター下の領域に影響

## まとめ

- マイクロレンズやカラーフィルター、シリコンなどの媒質特性を考慮し、CMOSイメージセンサー内部の光の 挙動を解析
- Poyntingを用いたフルウェーブシミュレーションにより、CMOSイメージセンサーのクロストーク解析が可能 参考文献
  - G. Agranov, V. Berezin, and R. H. Tsai, "Crosstalk and microlens study in a color CMOS image sensor", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, pp. 4?11, Jan. 2003.
  - C. C. Fesenmaier, P. B. Catrysse, "Mitigation of Pixel Scaling Effects in CMOS Image Sensors", Proc. SPIE, Vol. 6817 681706.



## 1.5 周期境界条件における斜め入射機能を使った解析

## 周期境界条件における斜め入射機能

Poyntingでは周期境界条件を使った周期的構造モデルに均一な任意の角度の斜め方向励振を実現する ことができます。



### モデル概観

周期境界条件を使用した解析領域中の媒質境界面上に角度をつけた光を照射し、反射率を計算します。



## FUJITSU

## <u>解析結果</u> 電界分布(アニメーション)入射角30度



## FUĴITSU



反射率





## 1.6 光学薄膜

Poyntingを用いた光学薄膜の解析事例を紹介します。



## 図1 各層をλ/4 (λ=500nm)の厚みとした光学薄膜

正弦波に変調をかけたパルス光を光学薄膜に入射させます。このパルス光は正弦波の波長を中心に広帯域 な特性を持つので、観測したい複数の波長の応答を一度に計算することができます。



## 図2 時間領域で見た光学薄膜に光パルスを入射したときの振る舞い

光パルスが光学薄膜に入射すると、反射光と透過光に分離されます。図2のアニメーションは、さまざまな波長の光を一度に観測していることになるので、どの波長が反射され、どの波長が透過しているかは図2ではわかりません。





FDTD法で計算した電磁界時系列データをフーリエ変換することにより波長ごとに光の振る舞いを可視化する ことができます。 図3、図4はフーリエ変換して得られた波長500nm、800nmのときの光の振る舞いです。こ の光学薄膜は、設定波長500nmの光は反射し、波長800nmの光は透過することがわかります。



## 図5 光学薄膜の反射率

図5は、この事例で用いた光学薄膜の反射特性を計算した結果です。波長500nm付近の波長はほぼ全反 射する特性を持ち、800nmの波長では反射率が低いことがわかります。この結果は、図3、図4のアニメーショ ン結果とも一致しています。

日次に戻る

#### 2 散乱問題

#### 2.1 微小導体球の散乱解析

Poyntingを用いた散乱解析事例として、Mie散乱[1]を紹介します。



散乱体 (微小導体球)

#### 微小導体球

半径:50nm(アニメーション結果) 導電率:1e+009(S/m)

#### 平面波源

励振方法:微分ガウス 偏光:X方向の垂直偏光 帯域:230nm~1500nm 波面:3350(nm)×3350(nm)

#### 図1 計算モデル

微小導体球に対して、十分広い平面励振波源を用意します。この励振波源から直線偏波で振動するパル ス波を発生させ、微小導体球に入射させることによって、散乱波を生じさせます。



図2 入射波+散乱波





図3 散乱波

微小導体球にパルス波を入射させたときのアニメーションです。散乱波は、微弱であるために図2から観測する ことは難しいですが、 散乱に寄与していない電磁波を取り除くことで、図3のようなリング状に広がる散乱波を 観測することができます。[2]



#### 図4 全散乱断面積の解析解と数値解との比較

Mie散乱の全散乱断面積の解析解と、Poyntingで計算した全散乱断面積[3]の数値解とを比較したグラフです。400nm~750nmの帯域に渡り、良好な一致を示しています。

[1] Mieが、電磁波が波長と同程度の球状物体に当たったときの散乱についての解析的な研究成果を発表したもの。

[2] ここでは反射も広義の意味で、散乱に含むものとします。

[3] (0、 Φ)方向の散乱断面積を極座標上のすべて方向で積分したものを表します。



## 3 メタマテリアル

#### 3.1 フォトニック結晶の透過特性解析

#### フォトニック結晶とは

- フォトニック結晶は、誘電率(屈折率)の周期構造を有し、その周期構造程度の波長を持つ光(電磁波)が存在できない周波数領域(Photonic Band Gap: PBG)を持つ。
- 光を自由に制御する技術として幅広い分野への応用が期待されており、盛んに研究されている。

### Poynting によるフォトニック結晶のモデリング

#### 周期境界条件

Poynting では周期境界条件を用いることで、無限周期構造を一セル分の計算に置き換えることがで き、フォトニック結晶のような周期構造のシミュレーションを短計算で行うことができます。



Poynting/GUI によるモデル作成

Poynting では、Copy機能を用いて同じ形状が並ぶ構造を簡単に作成できます。





図5

FUJITSU

## 透過係数スペクトル

特定の周波数帯(10-17GHz付近)にバンドギャップが見られる。

Poynting の計算結果は、Mode Matching 法による解析結果とよく一致し、計算の妥当性が確認で きる。 5 0 B -5 Mode Matching法(文献1) Transmission -10 Poynting -15 -20 -25 -30 5 0 10 15 20 25 Frequency [GHz]

## Poyntingを用いた透過係数の計算結果 図6

文献1 : A. Taflove and S C. Hagness, Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method, Third Edition, p.560, 2005.

## <u>まとめ</u>

- Poynting によるフォトニック結晶スラブの透過特性解析
- 透過係数の計算結果は、バンドギャップ特性をよく再現している。
- Mode Matching法との比較
- Poynting の計算結果は、Mode Matching法による解析結果とよく一致する。



## 3.2 フォトニック結晶および左手系媒質によるスーパープリズムおよびスーパーレンズ効果

フォトニック結晶および左手系媒質による負の屈折率によるスーパープリズム、およびスーパーレンズ効果の解 析事例を紹介します。なお、本事例は以下の文献を元に作成しました。

#### 参考文献

「スーパーレンズを組み合わせたフォトニック結晶スーパープリズムフィルタのFDTD解析」 松本 崇、藤田 晋 司、馬場 俊彦、電子情報通信学会技術研究報告 OPE2005-23 LQE2005-23 2005/06

#### 負の屈折率とは

通常の物質では媒質となる物体に入射した光は反対側に屈折しますが、負の屈折率を持つ物質では入射と 同じ側に屈折が起こります。負の屈折率をもつ物質は自然界には存在しませんが、光の波長以下の人工構 造(フォトニック結晶)を作ることにより、負の屈折率を実現できることが知られています。



#### スーパーレンズ効果

また、負の屈折率効果を利用して、回折限界を超えた極小のレンズを作成することなどが可能です。





解析モテル1 スー 解析領域	バーフリスム効果の例 10,000 x 40 x 10,000[nm]
波源	CW, Z偏光, λ=480nm 平面波, 入射角10度
媒質	n=2.963
円孔	n=1.000 r=44.336[nm]
円孔間隔	a=141.42[nm]
-	45度傾斜正方格子
<u>モデル概観</u>   	
励振位置	

2000.nm

z

х.

PC表面上の円孔に入射光に対し反対方向に20度程度 傾けた三角突起状孔を追加



解析モデル2 スーパーレンズ効果の例		
解析領域	6,450 x 40 x 10,000[nm]	
波源	CW, Z偏光, λ=480nm 球面波, FocalPoint= -2500nm(発散光)	
媒質	n=2.963	
円孔	n=1.000 r=44.336[nm]	
円孔間隔	a=141.42[nm]	
-	45度傾斜正方格子	

モデル概観



#### PC表面上の円孔を突起状に変形

### 左手系媒質モデルについて

また、Poyntingでは左手系媒質モデルによって、媒質条件自体に自然界には存在しない負の屈折率条件 を与えることができます。

以上、2モデルについてフォトニック結晶構造の代わりに下記の分散特性を持つ左手系媒質によって同様に負の屈折率を実現した場合を合わせて解析します。







## 解析結果

解析モデル1 スーパープリズム効果の例



フォトニック結晶構造

左手系媒質





フォトニック結晶構造

目次に戻る



左手系媒質

## 3.3 フォトニック結晶方向性結合器

Poyntingを用いたフォトニック結晶方向性結合器の事例を紹介します。

Poyntingは、フォトニック結晶方向性結合器における光波伝搬の様子を解析することができます。 この例では、図1に示すような2次元正方格子フォトニック結晶に線欠陥を設け、図2のようなフォトニック結晶 方向性結合器を作成します。入力ポートをport1、出力ポートをport2、port3とします。そして、port1から 光を入射します。方向性結合器において結合部の比誘電率を変化させることによって出力ポートがport2、あ るいはport3に入れ替わる様子を確認することができます。[1]

図3,4は方向性結合器の出力部の画像になります。図3はport2への出力が強い場合、図4はport3への出力が強い場合になります。









図4 結合部の比誘電率が小さい場合

[1] 下村正樹, 横田光広 宮崎大学工学部紀要, 第33号, pp.169-172(Jul.2004) 三星敏宏, 下村正樹, 横田光広 第12回電子情報通信学会九州支部学生会, C-21(Sep.2004)



## 3.4 フォトニック結晶光導波路

Poyntingを用いたフォトニック結晶光導波路の事例を紹介します。

Poyntingは、フォトニック結晶光導波路における光波の伝搬の様子を解析することができます。この例では、 図1に示すような2次元正方格子フォトニック結晶に欠陥を設けた、図2に示す90度曲がりフォトニック結晶光 導波路内を光波が伝搬する様子を評価しています。

このフォトニック結晶では、TEモードに対して規格化周波数 ωa/(2πc) が0.302から0.443の範囲にフォト ニックバンドギャップが存在しますが、TMモードに対してはフォトニックバンドギャップが存在しないことが知られて います[1]。ここで、ω、c はそれぞれ各周波数、真空中の高速度です。

図3,4はそれぞれ規格化周波数0.394における TEおよびTMモードに対する光波の伝搬の様子です。TEモ ードに対してはフォトニックバンドギャップによって光波が欠陥部分に閉じ込められて伝搬するのに対し、TMモー ドにおいては、フォトニック結晶内に光波が広がっていく様子が確認できます。









図3 TEモードの伝搬の様子



図4 TMモードの伝搬の様子 [1] M. Koshiba, J. Lightwave Technol., Vol. 19, pp. 1970-1975, Dec. 2001.

<u>目次に戻る</u>

## 4 プラズモン共鳴

## 4.1 表面プラズモンの解析

表面プラズモンが金属と誘電体の界面に閉じ込められて伝搬する現象を解析し、その挙動をアニメーションで示しています。界面に置かれた波源の励振方向に対する表面プラズモン発生の有無や、銀薄膜上に微細ギャップがある場合に光が放射される現象を再現しています。

## 表面プラズモン

表面プラズモンは物質表面の電荷や分極の集団的振動により発生します。表面平行方向には波動として伝搬し、垂直方向には指数関数的に減少する性質を持っています。

波長より小さな領域に光を局在化できるため、近接場光学において重要な現象です。工学分野でも発光素 子の高輝度化[注1]や大容量ストレージ技術などに利用されています。



[注1] K. Okamoto, et al., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 15, No. 2, pp. 1190-1209 (2009)

## 解析モデル

銀薄膜表面に波源を配置して、面に平行方向の電界成分を励振します。



Y方向は周期境界条件を適用し、2次元モデルとして計算しています。



### 計算結果





## [大阪公立大学 岡本先生ご提供]

## 表面プラズモンからの光放出

銀薄膜上に作成した微細なギャップにより表面プラズモンが変調し、光が放出される現象を再現しています。



-0.5





[大阪公立大学 岡本先生 ご提供]



## 4.2 プラズモン集光器

Poyntingを用いて作成したプラズモン集光器です[1]。シリコン基板の表面に金をコーティングし、さらに金の半球を円弧状に配しており、 金の表面を伝搬する電磁波を表示しています。観測ライン上の電界強度は計算値 と実験値でよく一致しています。

## [1]科学技術振興機構ナノフォトニクスチーム様 ご提供

W. Nomura, M. Ohtsu, and T. Yatsui, "Nanodot coupler with a surface plasmon polariton condenser for optical far/near-field conversion,"Appl. Phys. Lett. Vol. 86, No.18 May 2005,pp.181108 1-3



## 図1 計算モデル



図2 電界強度

## FUJITSU



<u>目次に戻る</u>



4.3 ナノ金粒子の局在表面プラズモンを用いたシリコン太陽電池の解析

## 解析モデル

ナノ金粒子を表面に付加したシリコン太陽電池の解析モデル





## まとめ

- ナノ金粒子による局在表面プラズモン増強を用いたシリコン太陽電池の解析
  - 3次元CAD機能を用いたモデル化が可能
  - Lorentz-Drudeモデルを用いた分散媒質が設定可能
- 金、シリコンの分散媒質特性を考慮した広帯域解析が可能
  - 。 金が負の誘電率を持つ条件での解析も可能
- ナノ金粒子の局在表面プラズモンとシリコン平面基板の相互作用を詳細に解析
  - 。 シリコン平面基板との比較
  - 。 ナノ金粒子の局在表面プラズモンによりシリコン基板内へ電磁界が散乱
  - 。 シリコン平面基板のみの場合より、ナノ金粒子による太陽電池の吸収効率改善が期待できる



## 5 光ファイバー

#### 5.1 光ファイバーの解析

Poyntingは、光波長領域の計算にも適用が可能で、光プローブや光ファイバーなどの光学デバイスを解析できます。この例では、光ファイバーにナノメートル光を当てた場合に、内部で発生する電界分布を求めています。





図2 解析結果 - 電界二乗値分布

## FUJITSU



図3 解析結果 - 電界二乗値分布(TOP VIEW)



#### 6 光波·熱解析連携

#### 6.1 光ファイバープローブモデルの熱解析

Poyntingを用いた光ファイバープローブモデルの熱解析事例を紹介します。

解析対象は、光ファイバープローブを用いて物体に光を照射したモデルです。算出された電磁界を発熱源とし、 熱が媒質中を伝導する過程を解析します。



図1 解析モデル

先端のアルミニウムからの発熱による温度分布を表示します。







図3 温度分布グラフ(999.680ps)



## 6.2 移動光源で照射された薄膜の熱解析

Poyntingを用いた突起パターンを持つ薄膜の熱解析事例を紹介します。



図2 突起パターン

光の入射により薄膜に発生する熱分布を表示します。

## FUJITSU



## 図3 温度分布の時間変化アニメーション

